

自動車用パワーソース技術の進歩

大澤克幸

鳥取大学大学院工学研究科 機械宇宙工学講座

Progress of Automotive Power Source Technology

Katsuyuki OHSAWA

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan

E-mail: ohsawa@mech.tottori-u.ac.jp

Abstract: Progress of automotive power source technologies in this 40 years is firstly summarized by reviewing 9 important technologies in the three areas of gasoline engine, diesel engine and new power source. It is explained that the progresses of engine and new power source technology developments are categorized as an incremental or sustaining innovation, considering the reasons why the engine technology still strongly proceeds over hybrid or fuel cell vehicle.

Key Words: Power Source, Automobile, Engine, Technology, Hybrid, Fuel Cell, Progress, Innovation

1. はじめに

本稿では筆者が研究、開発活動に従事した自動車用パワーソース技術の過去 40 年の進歩を概観し、今後の方向について考えてみたい。

表 1 に主な技術名称とその効果を示す。表 1 の主な技術は、筆者の独断と偏見で選択した現在も使われている重要な技術であって、その他にも継続して用いられている技術や、その後の技術進歩によって淘汰され消えて行った多くの技術がある。

表 1 中にはその効果を、熱効率（燃費）、比出

力、排気の 3 つの観点で記載したが、理解を助けるために改善率を概略のパーセントで示した。熱効率と比出力 100% の改善とは、熱効率や比出力が 2 倍になることを意味し、排気 100% の改善とは、排気がゼロになることを意味する。また、表中の“－”は該当項目での改良の意図が無かったと思われることを意味する。

2. ガソリンエンジンの技術

2. 1 ガソリン燃料噴射

筆者がこの分野の研究・開発を始めた 1975 年当時、ガソリンエンジンの燃料供給は気化器で行うのが主流であった。（図 1）[1] 気化器では、吸入空気がベンチュリーを通過する時に形成する負圧によって、フロート室からガソリンを吸い出し空気流によって微粒化して、混合気を燃焼室に供給する。ベンチュリーに形成される負圧は吸入空気量の 2 乗に比例し、ガソリン流量は空気量に比例するため空燃比が自動的に一定となる性質がある。正確に言えば、上記のメカニズムは中高流量（負荷）時に当てはまるが、低負荷時の少量ガソリン供給とは若干異なっている。その間につながる領域があり気化器で一定の空燃比の混合気を供給できない原因となっていた。[2]

この問題を解決するために開発されたのが電子

表 1 主な自動車用パワーソース技術とその改善率

Year	New Technology	(Thermal) Efficiency %	Specific Power %	Emission %
1971	Gasoline Fuel Injection	15	—	—
1977	3-Way Catalyst Emission Control System	—	—	90
1984	Lean Burn Engine	15	—	80 (NOx)
1995	Variable Valve Timing	20	20	—
1996	Direct Injection Gasoline Engine	20	10	—
1997	Hybrid System	100	—	40
1999	Common Rail Injection System	—	20	50 (Smoke)
2004	Clean Diesel Engine	15	30	50 (NOx, Smoke)
2015	Fuel Cell	50	—	100

燃料噴射装置（図2）である。電磁弁によってニードルを開閉することによって、一定圧力で加圧された燃料を噴射すれば、ニードルの開時間によって燃料噴射量を決められると共に、燃料圧力によって微粒化の向上が期待できる。（図3）今日から見れば非常に合理的な燃料噴射システムだが、当時は良い吸入空気流量計が無かったことや、電気システムより機械システムの方が信頼性が高かったため、普及には時間が掛かった。

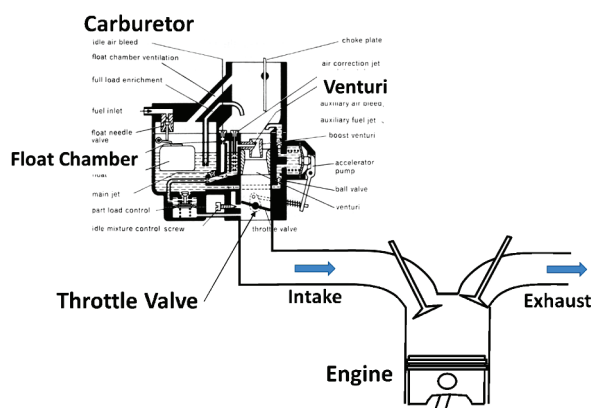


図1 気化器による燃料供給システム

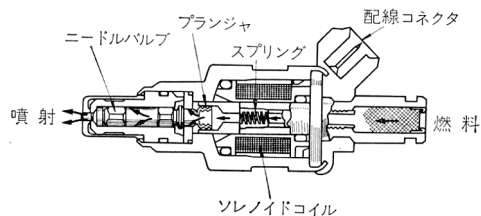


図2 燃料噴射弁[2]

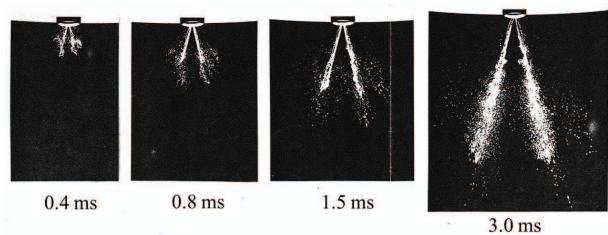


図3 燃料噴射弁から噴射される噴霧

空気流量計測には当初 D-Jetronic, K-Jetronic などが使われたが、その後ベーン式、熱線式などの各種空気流量センサーが実用化されたことと、三元触媒システムの実用化とが相まって、燃料噴射システムは1985年頃にはガソリンエンジン用燃

料供給システムの主流となり、気化器は用いられなくなった。

2. 2 三元触媒排気浄化システム

1970 年のマスキー法の提案とそれを受けた日本国内の排気規制の強化によって、自動車業界は排気規制対応技術の開発が急務となり、ホンダの CVCC など、各種新技術の開発が競って行われた。その中から現在生き残った技術が三元触媒排気浄化システムである。Pt を主体とする触媒は、 $\pm 5\%$ の空燃比ウィンドウに入る排気が通過すると、HC, CO, NO_x の三成分を同時に 90% 以上の浄化率で低減できる画期的な技術である。

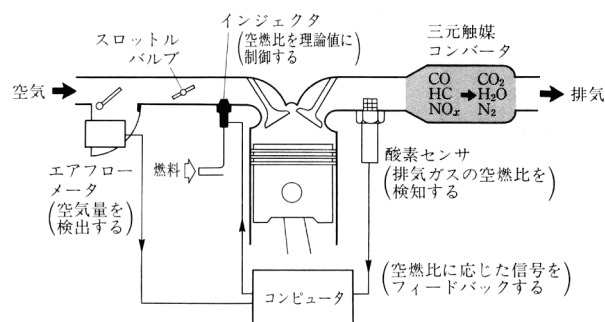


図4 三元触媒排気浄化システム[3]

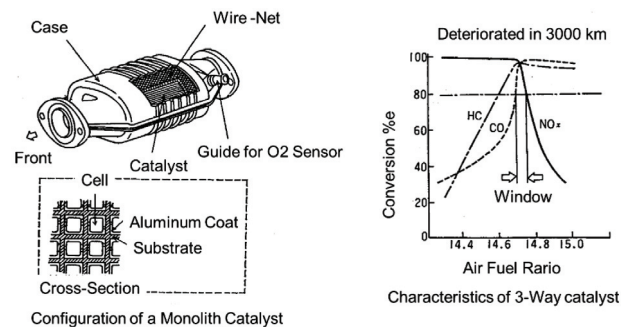


図5 三元触媒[3, 4]

このシステムは三元触媒によって始めて可能になった技術であるが、燃料噴射弁、空気流量計、酸素センサー、電子制御装置（ECU）などのそれぞれの要素技術があって初めて成り立つ技術である。

2. 3 リーンバーンエンジン

ガソリンエンジンの排気特性を図6に示す。一般的に、燃料リッチの場合にはNO_xは低いHC,

CO が高く、理論空燃比付近では HC, CO は低いが NO_x が高く、唯一燃料リーンで燃焼を行うと 3 成分共に低いという性質がある。

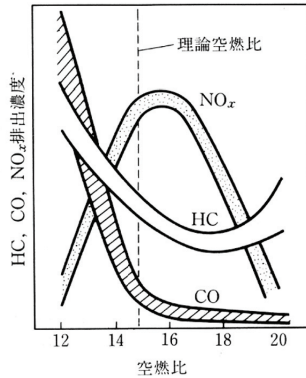


図6 ガソリンエンジンの排気特性[3]

この特性を利用して、三元触媒を使わずに排気規制をクリアしたいというのが当時のエンジン技術者の思いであった。燃焼技術の面からは、リーン燃焼を行いつつ EGR (排気再循環) によって燃焼温度を下げることで NO_x を低減することが試みられた。ところが、リーンバーンには次の二つの問題がある。

- ①空燃比が 24 付近を越えると失火が生じる。
- ②リーン燃焼では火炎伝播速度が遅いので、燃焼が不安定になる。また燃焼時間が増加して熱効率が悪くなる。

図6で空燃比 20 以上の排気が示されていないのは、失火のためである。また、図7には筒内圧と熱発生率を理論空燃比と希薄限界付近の例を 100 サイクル分重ねて比較してある。希薄限界付近では燃焼が不安定になり、測定値のばらつきが大きいことが分かる。

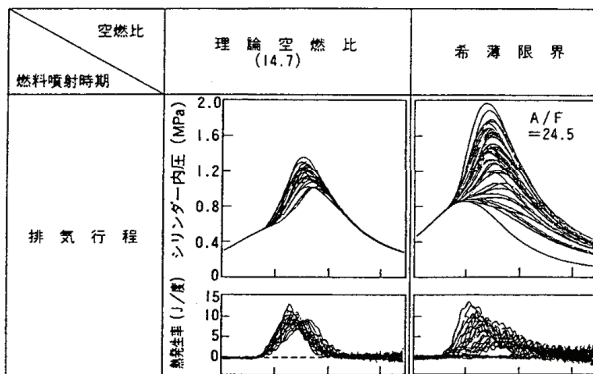


図7 リンバーンのサイクル変動

このような問題を解決するために、スワールやタンプルのような空気流動と乱流を活用した燃焼改善が積極的に試みられた。CVCC エンジンもリーンバーンエンジンではあるが、副室を使った成層リーンバーンであって、排気三成分の同時低減を意図したリーンバーンの本来の目的は減殺されていると言える。

リーンバーンエンジンは NO_x 低減を意図した技術ではあるが、同時に燃費 (熱効率) 改善効果も期待できるメリットがある。リーンバーンエンジンの熱効率改善は比熱比を高くできることにもよるが、実質的には同じ出力においてポンピング損失 (後述) を少なくすることによる効果の方が大きい。

2. 4 可変バルブ機構

可変バルブタイミング機構は元々吸気慣性を利用して空気の充填効率を向上するための手段として開発が始まった技術である。最初に実用化された可変バルブタイミング技術はホンダの VTEC である。リフトとタイミングの異なるロッカーアームを油圧機構によって切り替える方式である。

一旦可変バルブ機構が実用化されると、その機

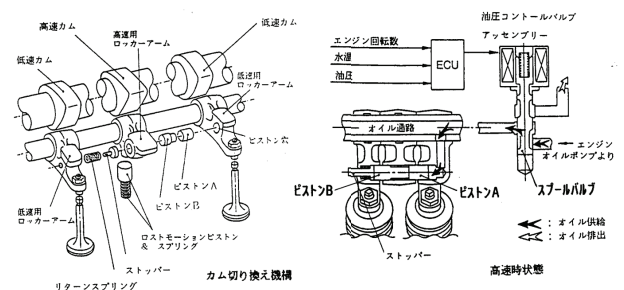


図8 ホンダの VTEC[5]

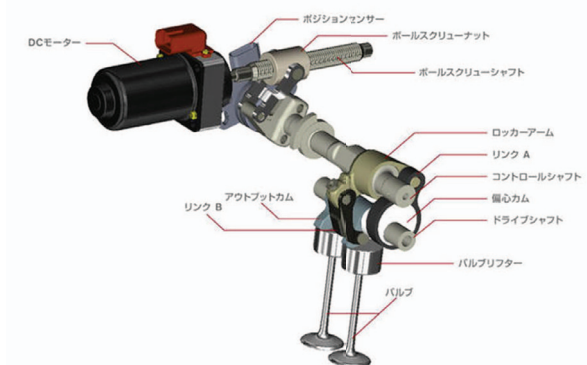


図9 日産の可変バルブ機構 VVEL[6]

能を生かして高膨張比エンジン（アトキンソンサイクルまたはミラーサイクル）や吸気遅閉じによるポンピング損失低減による熱効率向上や、究極的にはスロットルレスエンジンに向けた開発が活発化した。現在ではBMWのバルブトロニック、トヨタのバルブマチック、日産のVVEL（図9）など、現代の高効率エンジンの殆どはこの可変バルブ機構を備えていて各社各様の方式が実用化されている。可変バルブタイミングによる熱効率の向上は下記の原理に基づいている。

一般的にガソリンエンジンは高トルクで中速回転付近に熱効率が最大となる領域があり、低トルク、低速回転（低出力）では熱効率が低い。熱力学では図10(a)中の“1-2-3-4-5”のオットーサイクルを習うが、実際のサイクルでは、“5-6-7-1”の排気と吸気行程が存在する。

この中で“7-1”の吸気行程で、スロットルバルブが閉じている場合にはマニホールド負圧に逆らって吸気を行うため、外部から仕事を与える必要がある。これがポンプ損失と呼ばれるもので、低出力時に熱効率が低い原因となっている。これを改善するために、可変バルブタイミング機構を使って、吸気弁の遅閉じを行うと、“5-6-8-1”の行程となって網掛け部分のポンプ損失を減少させることができる。

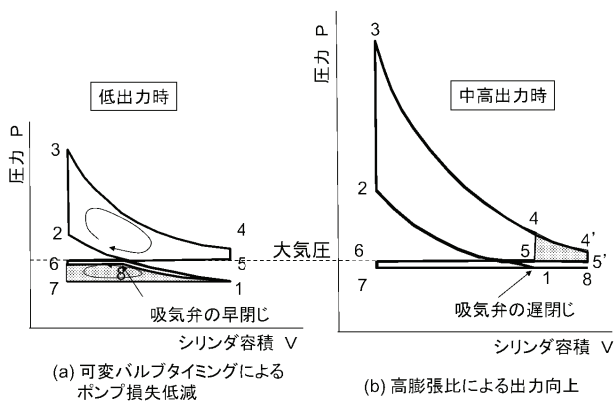


図10 可変バルブタイミングによる効率向上の原理

また、中高負荷時の膨張後に排気弁が開く時“4”には、筒内には高温で高压のガスが存在しているにも関わらず排気をしてしまう。そこで図10(b)のように膨張行程を長くすれば（高膨張比）“4-4'-5'-5”の部分の仕事として得ることができる。膨張行程を長くした分、バルブタイミング可変機構を用いて排気弁の閉弁を“1”まで遅くすることにより適切な圧縮比を確保することができる。

2. 5 直噴ガソリンエンジン

直噴ガソリンエンジン開発のルーツは1950年代のTexaco燃焼や1970年代のPROCOエンジンに代表される成層直噴である。[7] 当時は、全ての運転条件で安定した燃焼を実現することができず不成功に終わった。その後1996年に三菱自動車が開発したGDI(Gasoline Direct Injection engine)はタンブル流を利用してピストンに設けたキャビティー中に混合気を成層化する方式で、その後の世界的な成層直噴ガソリンエンジン開発競争を先導した。三菱のGDIに代表される初期の直噴成層ガソリンエンジンはウォールガイド方式と呼ばれるもので、トヨタのファンスプレイ燃焼D-4もこれに属する。[8]

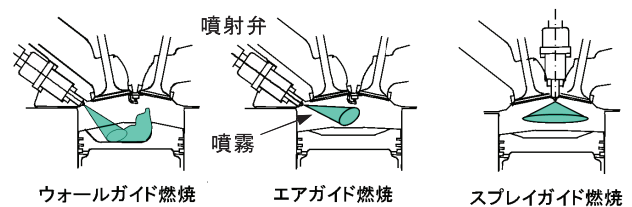


図11 各種直噴ガソリン燃焼

この方式は、ピストン頂面のキャビティー壁に沿って混合気が形成されるため燃料の壁面付着が多くなり、燃費悪化とPM生成の原因となる欠点があった。その後これらの問題を解決するため、エアガイドやスプレイガイド方式へと技術開発は変遷した（図11）が、いずれも低中負荷域での成層リーン燃焼と、高負荷域でのストイキ燃焼を組み合わせる必要があった。そのため、排気対策としてNOx吸蔵還元触媒が必要で、NOx還元のために燃料を消費するなどコストと燃費の両面で不利な要素を備えていた。そのため現在では、直噴でありながら理論混合気燃焼を行い、排気については三元触媒を用いるシステムが主流となっている。この場合、直噴化の効果は吸気流中での燃料蒸発による温度低下のため空気の充填効率が向上することと、吸気温度低下によって耐ノック性が向上するため圧縮比を向上できることにある。マツダのSky-Active Gではこの効果によって圧縮比を14まで上げて熱効率の向上が図られている。

3. ディーゼルエンジンの技術

3. 1 コモンレール燃料噴射

2000年頃までのディーゼルエンジンでは、プランジャー駆動による機械式燃料噴射装置が用いられ、大型では列型ポンプが、小型では分配型ポンプが用いられていた。これに対して、コモンレール噴射装置は、ディーゼル版の電子燃料噴射装置である。[9,10] 図12に示すように、サプライポンプで昇圧されて噴射弁に送られた燃料は、電磁弁の作動によって噴射期間が制御される。コモンレール燃料噴射には2つの効果がある。

第一に、燃料噴射圧が格段に高くなったことにより燃料の微粒化が向上し、空気との混合が向上した。それまでの機械式燃料噴射では400 bar程度の噴射圧であったものが、初期のコモンレールでも1000 bar、現在では2500 barまでの高压化が進んでいる。

二つ目の効果は、電子制御が可能になったことで、燃料噴射タイミングを運転条件に応じて自在

平均的には希薄燃焼であるから、図6で述べたように予混合希薄燃焼比率が増えると排気が格段に

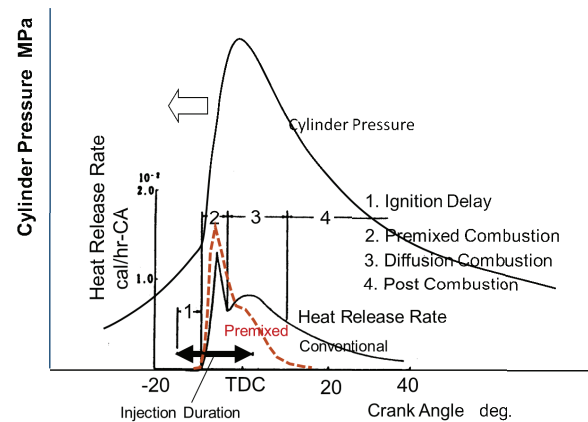


図13 ディーゼル燃焼の筒内圧と熱発生率

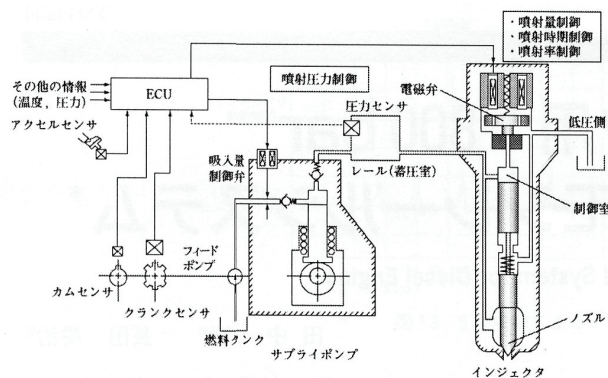


図12 コモンレール式燃料噴射システム[9]

に選べるようになり、パイロット噴射やポスト噴射が可能になった。最新のコモンレール噴射系では針弁駆動を電磁弁からピエゾ駆動に変えたことで一サイクル中での多段噴射が可能になり、後述するクリーンディーゼルエンジンに繋がる予混合圧縮自着火燃焼や排気処理のためのポスト噴射が行えるようになった。

3.2 クリーンディーゼル

コモンレール噴射が実用化されたことで、従来は拡散燃焼の代表と言われていたディーゼル燃焼が大幅に変化した。図13に代表的なディーゼル燃焼の筒内圧と熱発生率を示す。予混合燃焼化が進んだ最近のディーゼル燃焼では、燃焼期間が短縮され、拡散燃焼期間が不明確になって予混合燃焼の割合が増加した。ディーゼル燃焼は基本的に

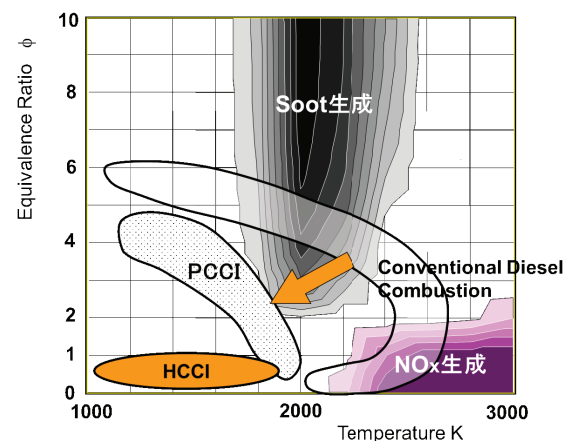


図14 クリーンディーゼル燃焼のΦ-Tマップ[11]

改善される。これに加えて、中低負荷域で効果的なHCCI(Homogeneous Compression Ignition)またはPCCI(Premixed Charge Compression Ignition)と呼ばれる超希薄予混合自着火燃焼法が開発されたことでディーゼルエンジンの排気は格段に改善された。この過程は図14に示す燃焼のΦ-Tマップによって上手く説明される。[11] 即ち、予混合化が進んでいない従来のディーゼル燃焼では、当量比Φが高い領域や燃焼温度が高い領域を通過するため、PMとNOxが発生する。これに対して、予混合化が進むと当量比Φが低く燃焼温度が低い領域を通過するため、エンジンの排気が格段に改善される。これらの燃焼改善にコモンレール噴射が果たした役割は極めて大きい。

エンジンからの排気が低減されたことに加えて、DPF や NOx 触媒などの排気処理技術が開発されディーゼルエンジンのクリーン化技術が進歩したことにより、今日のディーゼルエンジンシステムは、初期のものとは全く違うものになっている。[12]

3. 新しいパワースource

3. 1 ハイブリッドシステム

ハイブリッドシステムはエンジンの弱点を補うために開発されたシステムで、通常図 1 5 に示す 3 種類に分類される。[13] ホンダのハイブリッドはパラレル方式に分類されるのに対して、トヨタはシリーズパラレルハイブリッドに分類される。ここでは後者を例として説明する。因みに後述する燃料電池車は、エンジンと発電機を燃料電池に置き換えたシリーズハイブリッドに相当する。

図 1 6 にエンジンの出力特性と使用領域を示す。前述したように、一般的にガソリンエンジンは高トルクで中速回転付近に熱効率が最大となる領域があり、低トルク、低速回転（低出力）では

熱効率が低い。典型的な例は、回転数が低くトルクがゼロの原点付近が車のアイドル状態に相当し、熱効率はゼロとなる。これに対して運転時の使用領域は、変速機の使用ギアに対して実線のように変化するため、結果的に図 1 6 の帯状の領域を使うことになって、効率の高い条件だけでなく、効率が低い条件でも使わざるを得ない。これに対して、ハイブリッドシステムでは、エンジンは最大効率点付近のみを使って、その他の運転状態はモーターに任せることを意図したシステムである。

このことを実現するためにハイブリッドシステムでは下記の 4 点の狙いを可能にしている。

- ①エンジンを効率が良い限られた条件でのみ運転する。
- ②高膨張比や可変動弁系などによりエンジン本体の効率を向上する。
- ③出力が不要な時は、アイドル停止または気筒休止でエンジンを止める。
- ④動力回生によって制動エネルギーを電気として蓄えて再利用する。

この中で特に重要な技術が、①を可能にしたパワースプリット（動力分配）機構である。パワースプリット機構は、遊星歯車機構によってエンジン、モーターと発電機の回転と出力を自在に制御できるようにしたもので、結果的に無段変速機の役割も果たしていることになる。

この結果、ハイブリッドシステム車では、通常のガソリン車に比べて単位燃料当たりの走行距離を倍増することができた。（図 1 7）

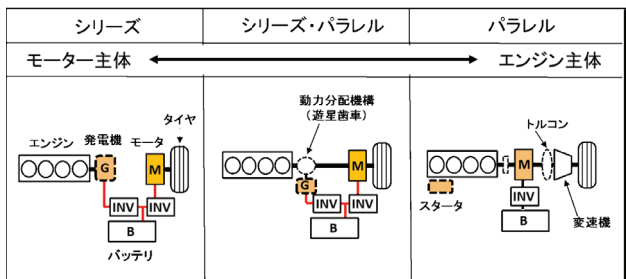


図 1 5 ハイブリッドシステムの分類

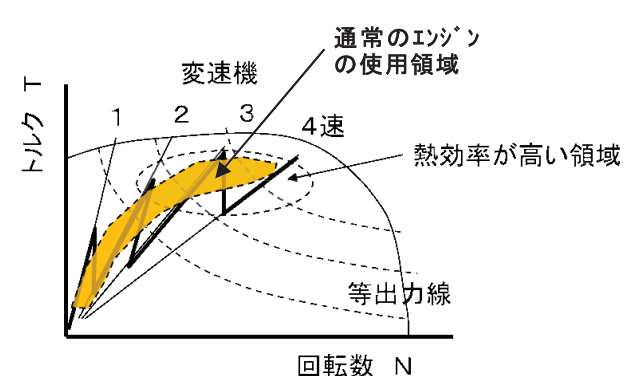


図 1 6 エンジンの出力特性と使用領域

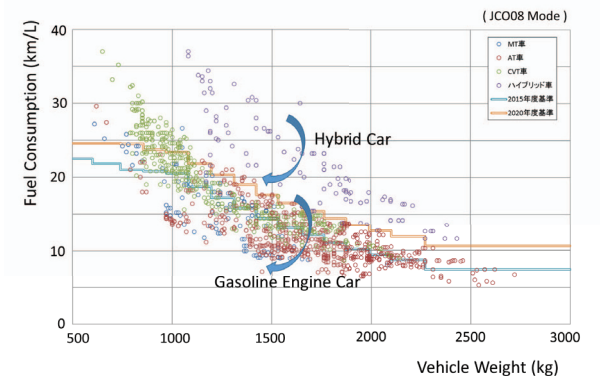


図 1 7 ガソリン車とハイブリッド車の燃費比較（2015 年）[14]

3. 2 燃料電池

燃料電池は水素を燃料として水しか排出しないことから、原理的なクリーンさと効率の良さを背景に未来の動力として期待されている。図18に示すように燃料電池とエンジンではその出力特性が正反対である。即ち、燃料電池は出力が小さい方が効率が良く、高出力では効率が悪い。燃料電池の効率は電圧効率で示されることが多いが、それには周辺補機による損失が考慮されていない。また、メタンを改質して工業的に水素を製造する場合には約10%のエネルギー損失があるだけでなく、水素を700気圧の高圧でポンペに圧縮充填するにも原理的に20%の損失を伴うことを考慮すると、現状ではWell to Wheelでの最大熱効率の比較で内燃機関より少し良い程度だと考えられる。それにも関わらず水素供給インフラを整えるプロジェクトが推進されるのは、エネルギーの多様化とベストミックスを実現するためということと、化学や製鉄プラントからの余剰水素に期待しているためであろう。

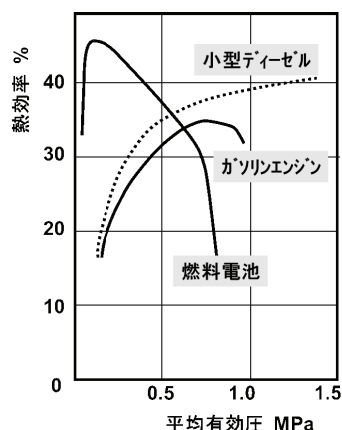
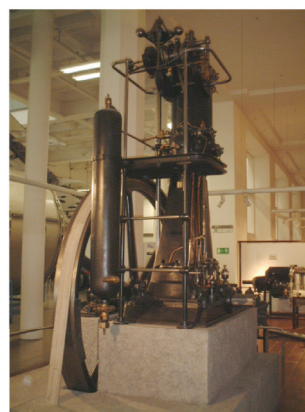


図18 燃料電池とエンジンの特性

3. エンジンの技術進歩とイノベーション

以上述べてきたように過去40年の自動車用パワーソース技術の進歩は目覚ましいものであった。しかしながらその進歩の程度を考えると、表1に示すように、ハイブリッド、燃料電池と1980年前後の排気改善を除けば一つの技術で数10%程度の改善効果しか見込めていない。図19はドイツ博物館に展示されている世界初のディーゼルエンジンである。その説明書によれば、熱効率は26.2%で比出力は0.75 kw/Lであった。これを参考にしてエンジンが発明されて以来100年間の進



Diesel Engine
Firstly Made by Rudolf Diesel
(1897)
Deutsches Museum (München)

図19 世界初のディーゼルエンジン

表2 過去100年の自動車用エンジンの性能進歩

Item	Improvement	Comment
Thermal Efficiency	+ 100%	26%→53%
Specific Power	x 100	1 kw/L→100 kw/L
Emission	x 1/100	%→100 ppm

歩を纏めてみると大略表2のようになる。

熱効率と比出力の進歩をそれぞれ年代に対して図にしたものが図20と21である。[15, 16]過去40年の燃費の進歩の速度は100年の進歩の延長線にあることが分かる。100年の進歩を平均的な年率の改善代に換算すると、燃費で1%/年、比出力と排気で4.7%/年と言う程度である。この程度の進歩でも積み重ねれば間違いなくイノベーションであったと言えるであろう。それにも関わらず、近年のイノベーションブームの中にあっては、エンジン技術の進歩はイノベティブだとは見られないことが多い。

近年イノベーションには二種類あると考えら

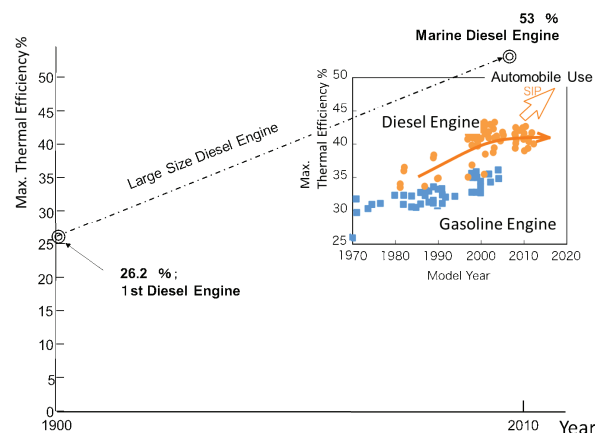


図20 熱効率の改善トレンド

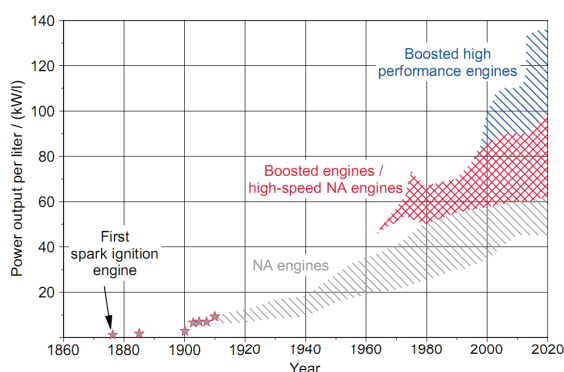


図 2 1 比出力の改善トレンド[16]

れている。[17, 18] 一つは、バイオテクノロジー、青色 LED や原子力のように、科学技術の担い手が革新的な技術を提供することによって社会変化が起きるもので、「破壊的イノベーション」と呼ばれるシーズ先行型の技術イノベーションである。その一方で見逃してならないのが、「インクリメンタルイノベーション」[17]または「持続的イノベーション」[18]と呼ばれるものである。これは、ユーザーニーズに基づくイノベーションであって、ポケベルからスマートフォンに至るまでのコミュニケーション技術の変遷や SUV 車の拡大が例として挙げられている。この種のイノベーションは技術サプライヤーと、ユーザの中にいるアーリーアダプターとの間の相互作用を通じて段階的に技術変化が進むために時間が掛かり、継続的な企業活動の源泉である。エンジンの技術進歩もこのカテゴリーに加えられるもので、排気規制や燃費に対する社会ニーズに基づいて段階的に行われた技術進歩が結果的に自動車技術の変革と爆発的利用拡大に繋がったと言える。今日、自動車、新幹線、環境技術など、このインクリメンタルイノベーションによって進歩したと考えられる幾つかの技術分野において、日本の産業競争力が高いことは注目に値する。

4. 今後の動向

以上述べて来たように、過去の自動車用パワーソース技術の進歩はゆっくりだが着実であった。最近「電気自動車やハイブリッド車が出て来たのにエンジン車が相変わらず元気なのはなぜか」と問われることが時々ある。その問いに答えながら自動車用パワーソースが今後はどうなっていくのかについて考えてみたい。

図 2 2 [14]は図 1 7 と同じガソリン車とハイブリッド車の燃費を 2005 年当時比較したもので

ある。両者を比べると、ハイブリッド車は車種は増えたが燃費水準は大略変化していない。これに対してエンジン車の燃費は大幅に向上していることが分かる。これは、ハイブリッド車で使われた 4 つの技術の中の②③④がエンジン車にも適用された結果である。これらの技術は、ハイブリッド車において先行的に導入されたものの、エンジン車にも適用可能な技術であったため、近年積極的に採用されている。その結果エンジン車の燃費が見違えるほど向上したことにより、エンジン車が相

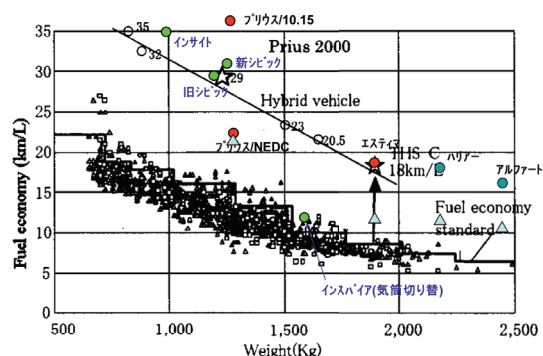


図 2 2 ガソリン車とハイブリッド車の燃費比 (2005 年) [14]

変わらず元気に見えるものと思われる。とは言え、ガソリン車用とハイブリッド車用のエンジンでは①の点は決定的に異なり、その分の燃費差は埋めようが無い。

一方、30 年後の CO₂ 安定化目標 (450 ppm) を実現するためには、車の生産台数の増加も考えると、一台当たりの CO₂ 排出量を現在の 1/3 程度に低減する必要があると言われている。図 2 3 に近年の自動車からの CO₂ 排出量の動向を地域別に示す。上記に向けて平均年率 4.5% の CO₂ 低減の傾向を

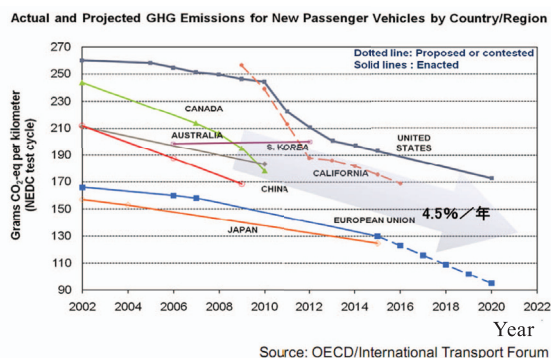


図 2 3 世界の地域別自動車燃費改善[19]

読み取ることができる。化石燃料を使うエンジン車の場合、CO₂排出量の低減はエンジンの熱効率向上とほぼ等価と見ることができる。先にも述べたように、エンジン単体の熱効率は1%/年程度の改善速度であって、年率4.5%のCO₂低減を実現するための不足分は、システムの改良、ハイブリッド車の導入や車両の軽量化、電気自動車や燃料電池車の導入によって補わなければならないことになる。とは言っても、電気自動車や燃料電池車には、CO₂削減効果、利便性、コストのいずれを見ても、破壊的イノベーションを起してエンジン車を凌駕するほどの魅力は今の所無い。

この様な状況を踏まえて、現在 IEA によって想定されている自動車の動力別年次推移の予測は図24の様になっている。[20, 21] エンジン車の数は2020年頃から減少し始めるが、ハイブリッドやプラグインハイブリッドにも使われるエンジンを考慮すると、エンジンそのものの生産台数は

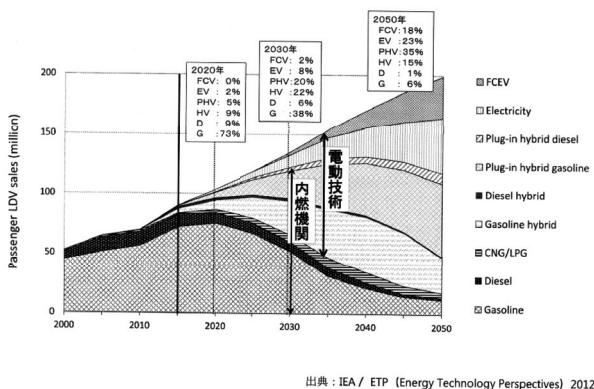


図24 世界の自動車販売台数の動力別予測[21]

2040年に至るまで増加を続けることになる。もとより、インクリメンタルイノベーションに位置付けられる継続的な改良がそのベースにあっての話であることは言うまでもない。その技術の中身としては2.1~2.9に述べた各技術の改良と組み合わせに加えて過給ダウンサイジング、排熱回収やフリクション低減などの新技術開発が模索されている。[15]

参考文献

- [1] Heywood J.B.: Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, Inc. pp16, 1988.
- [2] 五味 努 監修：自動車工学全書4 ガソリンエンジン, 山海堂, 昭 55.
- [3] 一億人の化学・車と化学, 大日本図書, pp. 13, 1991.
- [4] 同上, pp. 193.
- [5] ホンダホームページ: (<http://www.honda.co.jp/tech/auto/engine/vtec/>)
- [6] 日産自動車ホームページ: (<http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/vvel.html>)
- [7] 長尾不二夫, 内燃機関講義 上巻, 養賢堂, 1982.
- [8] 小池 誠: 直噴ガソリンエンジンの未燃排出物低減に関する研究、京都大学博士論文, 2006.
- [9] 田中 泰, 長田耕治: ディーゼルエンジン用1800bar コモンレールシステム, 自動車技術 Vol. 58, No. 4, pp. 19-24, 2004.
- [10] Miyaki, M., et. al.: Development of New Electronically Controlled Fuel Injection System ECD-U2 for Diesel Engines, SAE Technical Paper, No.910252, 1991.
- [11] Arcoumanis C., Kamimoto T.: Flow and Combustion in Reciprocating Engine, Springer, pp.357, 2008.
- [12] 森 一俊: 商用車用ディーゼルエンジンの昨日・今日・明日, 第20回内燃機関シンポジウム講演論文集, pp. 503, 2009.
- [13] 関 康成: 普及を目指したGlobal ハイブリッドカーの開発, 日本機械学会基礎教育講習会資料, NO.10-115, 2011.
- [14] 環境省ホームページ: (<http://www.mlit.go.jp/common/001084231.pdf>), 2015.
- [15] 内閣府ホームページ: SIP/革新的燃焼技術/ディーゼル燃焼, 2015.
- [16] Pischinger S.: Fuel as a Design Parameter for Future Low Emission Engines, 2015 PF&L Meeting, Key Note Speech 2, CD-ROM, 2015.
- [17] 鷲田祐一: イノベーションの誤解, 日本経済新聞出版社, 2015.
- [18] Christensen, Clayton M.: The Innovator's Dilemma, Harvard Business School Press, 1997.
- [19] ICCT Global Comparison; Light-duty Fuel Economy and GHG, 2014.
- [20] IEA/ETP: Energy Transport Perspectives, pp. 443, 2012.
- [21] 田中宗介: 自動車技術会 2015 春季大会フォーラム/15 FORUM-8, pp. 16, 2015.

(受理 平成27年10月30日)